文章编号:1000-4939(2023)04-0917-09

受压区跨中加强塑钢纤维轻骨料混凝土梁受弯性能试验研究

牛建刚[1],许文明[1,2],梁剑[3]

(1. 内蒙古科技大学土木工程学院,014000 包头;2. 重庆大学土木工程学院,401331 重庆;
3. 广西大学土木工程学院,530004 南宁)

摘 要:考虑到塑钢纤维轻骨料混凝土梁受压区跨中的力学性能是梁整体受弯力学性能提高的关键因素,以跨中局部受压区使用钢纤维加强、螺旋箍筋和矩形箍筋加强 3 种加强方式为基本参数,完成了 6 根受压区加强塑钢纤维轻骨料混凝土梁受弯加载试验研究。讨论了加强方式、纵筋配筋率和加强区混凝土强度对塑钢纤维轻骨料混凝土加强梁受弯力学性能产生的影响。结果得出:塑钢纤维对轻骨料混凝土梁有增韧阻裂、延缓裂缝发展的作用,且经受压区跨中加强后的塑钢纤维轻骨料混凝土梁超筋破坏现象得到明显改善;受压区跨中使用螺旋箍筋加强试件的承载力和延性最好,受压区跨中使用钢纤维加强试件的混凝土极限压应变最大,受压区跨中使用矩形箍筋加强混凝土试件延性最差;增大纵筋配筋率,受压区跨中使用钢纤维加强试件的承载力有明显提高,但延性降低,增大加强区混凝土强度,受压区跨中使用钢纤维加强试件承载力有一定程度提高,而延性变化不大。

关键词:塑钢纤维;轻骨料混凝土;超筋梁;抗弯性能;延性

中图分类号:TU528.2 **文献标志码**:A **DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2023.04.022

Experimental study on flexural performance of reinforced plastic steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete beams in compression zone

NIU Jiangang[1],XU Wenming[1,2],LIANG Jian[3]

(1. School of Civil Engineering,Inner Mongolia University of Science and Technology,014000 Baotou,China;
2. School of Civil Engineering,Chongqing University,401331 Chongqing,China;
3. School of Civil Engineering,Guangxi University,530004 Nanning,China)

Abstract:Considering that the mechanical properties of the compression zone of plastic steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete beams in the mid span are the key factor in improving the overall bending mechanical properties of the beams,six compression zone reinforced plastic steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete beams were tested under bending loading using three strengthening methods:steel fiber reinforcement,spiral stirrups,and rectangular stirrups as the basic parameters for the local

收稿日期:2021-04-13 **修回日期**:2021-06-15
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51368042);内蒙古自治区青年科技英才支持计划资助项目(No. NJYT-18-A06)
通信作者:许文明。E-mail:xuwenming163@163.com
引用格式:牛建刚,许文明,梁剑. 受压区跨中加强塑钢纤维轻骨料混凝土梁受弯性能试验研究[J]. 应用力学学报,2023,40(4):917-925.
NIU Jiangang,XU Wenming,LIANG Jian. Experimental study on flexural performance of reinforced plastic steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete beams in compression zone[J]. Chinese journal of applied mechanics,2023,40(4):917-925.

compression zone in the mid span. The effects of reinforcement methods, longitudinal reinforcement ratio, and concrete strength in the reinforcement zone on the flexural mechanical properties of plastic steel fiber reinforced lightweight aggregate concrete reinforced beams were discussed. The results show that plastic steel fibers have the effect of toughening, cracking resistance, and delaying crack development on lightweight aggregate concrete beams, and the phenomenon of super-reinforced failure of plastic steel fiber lightweight aggregate concrete beams has been significantly improved after mid span strengthening in the compression zone. The bearing capacity and ductility of the specimens reinforced with spiral stirrups in the mid span of the compression zone are the best, while the ultimate compressive strain of the concrete reinforced with steel fibers in the mid span of the compression zone is the highest, while the ductility of the concrete specimens reinforced with rectangular stirrups in the mid span of the compression zone is the worst. By increasing the longitudinal reinforcement ratio, the bearing capacity of the specimens strengthened with steel fibers in the mid span of the compression zone has been significantly improved, but the ductility has decreased. By increasing the concrete strength in the strengthened zone, the bearing capacity of the specimens strengthened with steel fibers in the mid span of the compression zone has been improved to a certain extent, with little change in ductility.

Key words: plastic steel fiber; lightweight aggregate concrete; super reinforced beam; bending resistance; ductility

轻骨料混凝土轻质、高强[1-2]、变形能力良好，被广泛应用于高层、大跨工程结构[3]。塑钢纤维抗拉强度高、弹性模量大、具有优良的抗腐蚀能力[4-5]。故在轻骨料混凝土中掺入一定量的塑钢纤维，能够极大地增强轻骨料混凝土的脆性和韧性[6-7]。研究发现，尽管轻骨料混凝土梁在加入塑钢纤维后对受拉区混凝土有所加强，但对受压区的提升效果很小[8]。所以一旦纵筋配筋率增大，可能会发生纵筋还没有屈服，受压区混凝土边缘就达到了极限压应变而试件发生破坏的超筋破坏情况，未能完全利用钢筋的有效利用效率，并且这种破坏毫无征兆，规范中是限制发生的[9]。

通过对高配筋率混凝土梁受压区进行加强，可以提高混凝土极限压应变[10-12]，从而提高梁受压区混凝土的抗变形能力，梁在承载能力提高的同时，延性等力学性能也得到相应提升[13-15]，ZIARA 等[16]通过将受压区局部普通混凝土改变成钢纤维来研究梁的受弯力学性能，研究发现受压区经钢纤维加强后，试件受压区的混凝土极限压应变得到了提高，极限荷载增大，试件的延性也有很大程度增大，且试件的承载力随着纵筋的配筋率的增大而变大。HADI 等[17]通过在局部受压区配置螺旋箍筋加强对梁进行试验，研究发现，局部受压区经螺旋箍筋约束后，受压区跨中混凝土使用螺旋箍筋后，箍筋的约束作用极大地提高了约束区混凝土的压应变，承载能力增大的同时极大地改善了梁的整体性能。BASE 等[18]以不同纵筋配筋率、箍筋加强方式为基本参数，完成了使用加密箍筋、普通箍筋和复合螺旋箍筋加强跨中受压区的 3 种方式对梁的试验研究，由试验结果可知，在梁受压区配置箍筋约束对少筋梁力学性能没有提高，然而对适筋梁和超筋梁的力学性能有一定程度提高，破坏模式有明显改善。普通混凝土通过加强受压区方式提高梁的力学性能已经得到证实，然而轻骨料混凝土梁具有更大的脆性[19,21]，对轻骨料混凝土受压区加强具有一定的意义。

本研究通过采用钢纤维加强、螺旋箍和矩形箍约束 3 种加强受压区方式，分析加强方式对受压区跨中加强梁受弯力学性能的影响以及加强区混凝土强度、配筋率对受压区跨中钢纤维加强梁受弯力学性能的影响。在对比试验结果的基础上，得出对试验梁的力学性能提高最好的加强方式。同时为塑钢纤维轻骨料混凝土梁的广泛使用奠定理论基础。

1 试验概况

1.1 试验设计

试验设计了 6 根混凝土梁，试验分为 4 组，根据跨中受压区加强方式分为塑钢纤维加强(无加强)、钢纤维加强、矩形箍筋约束和螺旋箍筋约束。其中

钢纤维加强组按照研究参数(轻骨料混凝土强度和纵筋配筋率)分为 3 组,表 1 为试件具体的参数表。梁截面长度 l = 2 100 mm,宽度 b = 150 mm,高度 h = 300 mm,净跨 l_0 = 1 800 mm。受压区跨中加强区为两加载点各自往外延伸 100 mm。图 1 为试件的具体配筋情况和截面尺寸以及加强区示意图。

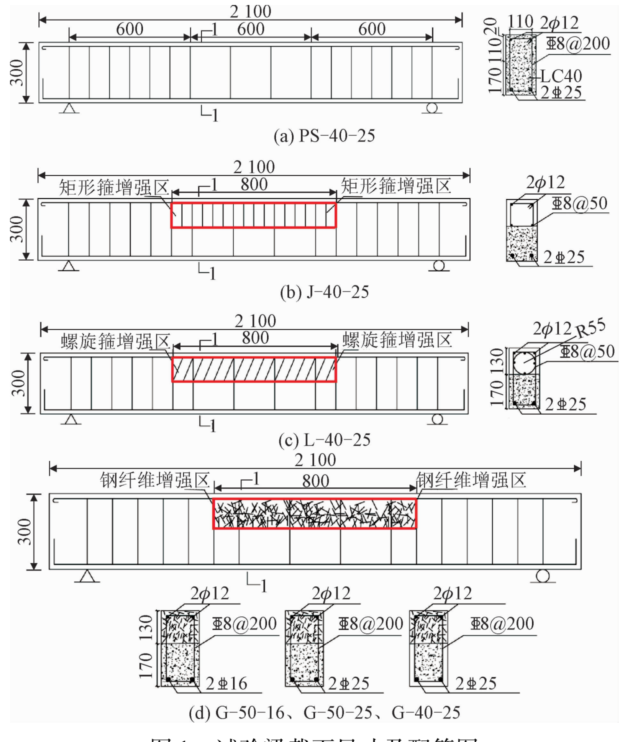


图 1　试验梁截面尺寸及配筋图

Fig. 1　Cross section size and reinforcement of test beam

表 1　试件参数

Tab. 1　Test piece parameters

试件	受压区加强方式	加强区混凝土强度	纵筋	配筋率/%
PS-40-25	塑钢纤维	LC40	2 Φ 25	2.52(超筋)
G-50-16	钢纤维	LC50	2 Φ 16	1.02(适筋)
G-50-25		LC50	2 Φ 25	2.52(超筋)
G-40-25		LC40	2 Φ 25	2.52(超筋)
J-40-25	矩形箍筋	LC40	2 Φ 25	2.52(超筋)
L-40-25	螺旋箍筋	LC40	2 Φ 25	2.52(超筋)

注:试件编号信息分为 3 部分,分别表示受压区混凝土加强类型(PS-无加强,J-矩形箍筋约束加强,L-螺旋箍筋约束加强,G-钢纤维加强)加强区混凝土强度等级和纵筋直径。如 G-50-25 表示受压区跨中采用钢纤维加强,混凝土等级采用 C50,纵筋直径为 25 mm 的试件。

1.2　材料性能

受压区跨中加强试件的基体(除加强区以外的区域)混凝土使用 LC40 塑钢纤维轻骨料混凝土,螺旋箍跨中加强受压区使用 LC40 塑钢纤维轻骨料混凝土,钢纤维局部加强受压区使用 LC40、LC50 钢纤维轻骨料混凝土整体浇筑。轻骨料混凝土的制作根据《轻骨料混凝土技术规程》(JGJ51-2002)[22] 具体配合比见表 2。混凝土梁配置采用页岩陶粒,各项性能指标见表 3。纤维力学性能见表 4,纵筋的力学性能参数见表 5。

表 2　试验配合比和抗压强度

Tab. 2　Test mix proportion and compressive strength

强度	水/(kg·m^{-3})	水泥/(kg·m^{-3})	粗骨料/(kg·m^{-3})	细骨料/(kg·m^{-3})	减水剂/(kg·m^{-3})	塑钢纤维/%	钢纤维/%	f_{cu}/MPa
LC40	189	473	586	585	7.10	9	–	44.7
LC40	176	356	994	846	4.27	–	78	47.6
LC50	160	426	1 104	736	7.23	–	78	54.5

表 3　页岩陶粒的各项性能指标

Tab. 3　Performance indexes of shale ceramsite

粒径/mm	筒压强度/MPa	24 h 吸水率/%	堆积密度/(kg·m^{-3})	表观密度/(kg·m^{-3})
5 ~ 10	6.9	4.8	780	1 333

表 4　纤维性能参数

Tab. 4　Fiber performance parameters

种类	长度/mm	直径/mm	密度/(g·cm^{-3})	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	伸长率/%
塑钢纤维	30	0.8	0.95	9.8	540	15 ± 2
钢纤维	30	1.0	7.8	200	1 100	–

表 5 钢筋力学性能

Tab. 5 Mechanical properties of reinforcement

型号	直径/mm	弹性模量/GPa	屈服强度/MPa	极限强度/MPa	伸长率/%
HRB400	16	20	436	600	22
HRB400	25	20	508	660	22

1.3 加载设备与制度

1.3.1 测试方案

钢筋的应变片布置为在每一个试件的最大弯矩处(即受拉钢筋中部)和加载点处贴电阻应变片,混凝土的应变片布置为在试件跨中由顶部至上而下以 30 mm 为间隔布置纸质应变片。在试件顶部和低部分别粘贴 3 个应变片。从试件跨中中间向两端依次布置位移计,主要量测支座两侧、加载点、跨中的位移变化,最后试验梁挠度为跨中位移计读数与支座处位移之差以避免支座沉降误差。具体量测仪器布置图如图 2 所示。

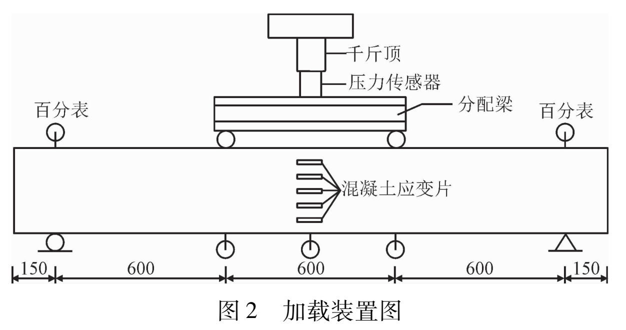


图 2 加载装置图

Fig. 2 Loading device

1.3.2 加载装置与制度

试验使用跨中三分点集中加载,完成了从混凝土开裂、裂缝开展直至梁受弯破坏的全过程试验,布置了钢筋、梁底、梁顶、梁侧混凝土表面应变,加载装置如图 2 所示。钢筋应变片布置在试件中部和两加载点处。试验进行分级加载,加载制度采用《混凝土结构试验方法标准》中的相关规定。

2 试验结果分析

2.1 梁破坏现象及分析

各试件裂缝发展如图 3 所示。从图中可以看出,PS-40-25 试件破坏时梁上裂缝开展不宽,延伸不高,该破坏是由于混凝土突然破坏导致的,无任何征兆,属于典型的超筋破坏,除了 PS-40-25 试件,其他试件都发生了适筋破坏,破坏现象大致为:在(0.15 ~0.25)M_u(M_u为试验梁的极限弯矩)时,加载点处产生了首条裂缝,随后荷载不断增加,裂缝开展越来越迅速,在主裂缝旁边产生了几条竖直裂缝,当主裂缝发展到大约截面高度的 1/2 时,试件弯剪区产生了第 1 条斜裂缝,伴随着斜裂缝的出现,竖向裂缝发展缓慢。随着荷载的进一步增大,斜裂缝不断向支座处延伸,裂缝宽度越来越明显,当荷载接近屈服荷载时,试件挠度和裂缝宽度迅速增加,当竖向裂缝宽度为大约 0.2 mm,荷载达到极限弯矩,梁受压区混凝土压碎,总的来说,高配筋率塑钢纤维轻骨料混凝土梁经受压区加强后的,梁的破坏由超筋破坏形态改变为适筋破坏形态,且试件破坏时,受压区混凝土完整性较好,梁的刚度得到了提高。

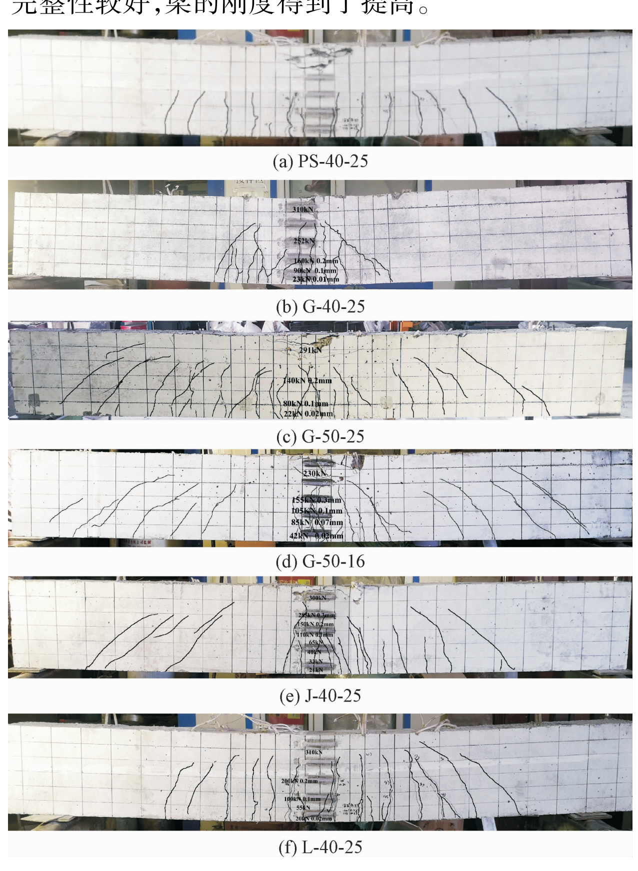


图 3 试件裂缝图

Fig. 3 Crack diagram of test piece

经过对受压区加强塑钢纤维轻骨料混凝土梁的破坏现象分析可知,由于纤维对受压区混凝土的抑制作用比箍筋对受压区混凝土的约束作用更加均匀,钢纤维加强试件的顶部混凝土破坏模式比箍筋加强试件的顶部混凝土破坏模式更完整,试件 G-40-25 的破坏形态比 J-40-25 和 L-40-25 的受压区顶部破坏形态更好。对于钢纤维加强受压区混凝土梁,低

配筋率梁与高配筋率梁相比,裂缝开展更密集,挠度更显著,低强度混凝土梁与高强度梁相比,挠度更大。

2.2　平截面假定

由图 4 可知,总的来说,每个弯矩所在的应变沿着截面高度的分布规律基本近似于直线，且底部与顶部相对称位置的应变基本相同,说明对塑钢纤维轻骨料混凝土梁受压区进行加强的方式基本符合平截面假定,且随着荷载增大,试件的受压区高度逐渐向上移。图中个别试件应变出现缺失情况,主要是由于试验过程中应变片的破损导致的。对于受压区不同加强方式的试件,受压区跨中采用矩形箍筋约束试件的受压区高度上移最大,采用钢纤维加强试件的受压区高度上移最小。对于受压区跨中采用钢纤维加强试件,提高加强区混凝土和增大纵筋配筋率,试件的受压区高度变化不大。

(a) G-40-25　(b) G-50-25　(c) G-50-16　(d) J-40-25　(e) L-40-25

图 4　平截面假定

Fig. 4　Plane section assumption

2.3　梁纵筋弯矩-应变曲线分析

图 5 为试件弯矩-纵向钢筋应变图,由图可知,除了 PS-40-25 试件的纵筋未屈服以外,其余所有试件的纵向钢筋都是在混凝土压碎前屈服,说明除了 PS-40-25 发生超筋破坏以外,其余试件均发生适筋破坏。对于受压区跨中采用不同加强方式的试件,荷载加载初期,各试件曲线斜率大致相同,荷载主要是由纤维混凝土和钢筋协调控制,但随着荷载进一步增大,纵筋达到屈服强度,此时,受压区跨中采用矩形箍筋约束试件的纵筋应变最小,受压区跨中采用钢纤维加强与螺旋箍筋约束的试件纵筋应变相差不大,由此可得,受压区跨中采用螺旋箍筋和钢纤维加强可以延缓纵筋的破坏,提高加强梁的钢筋有效利用率。

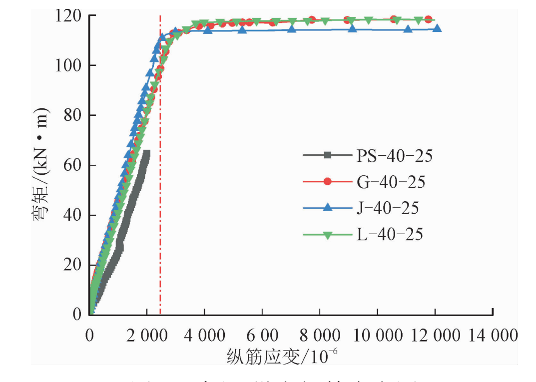


图 5　弯矩-纵向钢筋应变图

Fig. 5　Bending moment-strain diagram of longitudinal reinforcement

2.4　加强梁弯矩-受压区混凝土压应变曲线分析

跨中加强塑钢纤维轻骨料混凝土梁的力学性能

可以由加强区混凝土压应变间接体现。具有越高的极限压应变,试件的受弯性能更好。

受压区跨中使用不同加强方式试件的弯矩-受压区混凝土压应变关系曲线如图6(a)所示。对于受压区跨中使用不同加强方式的试件,使用钢纤维加强方式的试件极限压应变最大,使用螺旋箍筋和矩形箍筋加强的试件混凝土极限压应变差别不大,试验梁G-40-25与J-40-25和L-40-25的极限压应变相比,各自增加了69.02%和51.12%。分析原因,可能是使用箍筋约束受压区混凝土时,无论是矩形箍还是螺旋箍筋约束,都是对核心混凝土的约束强而受压区顶部边缘较弱,但钢纤维加强受压区混凝土时,纤维的约束比较均匀,由此可知,采用纤维约束时受压区混凝土顶部边缘的极限压应变更大,使用钢纤维加强跨中受压区的方式对提高受压区极限压应变成效最好。这也与受压区采用钢纤维能改善塑钢纤维轻骨料混凝土梁顶部混凝土破坏形态相一致。

受压区跨中使用钢纤维加强时不同纵筋配筋率梁的弯矩-受压区混凝土极限应变曲线关系如图6(b)所示。由图6(b)中可以看出,荷载加载初期,不同纵筋配筋率试件曲线斜率大致相同,随着荷载继续增大,混凝土初裂后,采用直径为25 mm的纵筋的试件斜率比直径为16 mm的斜率稍大。分析原因,可能是随着配筋率增大,试件截面弯矩变大,从而使受压区跨中混凝土变形能力变差,与使用纵筋直径为25 mm的试件受压区混凝土极限压应变相比,使用纵筋直径为16 mm的受压区跨中混凝土极限压应变增加了70%。由此可得,增大纵筋配筋率,可以提高受压区混凝土的极限应变,增加跨中受压区混凝土的贡献率。

受压区跨中使用钢纤维加强时不同混凝土强度试验梁的弯矩-受压区混凝土极限压应变关系曲线如图6(c)所示,试件纵筋屈服后,加强区混凝土强度高的试件曲线斜率比较大,弯矩增加迅速,而混凝土极限压应增速较小。分析原因,可能是混凝土强度提高后,受压区抵抗弯矩能力增强,但随着强度提高,混凝土的脆性变大,混凝土压应变降低。加强区混凝土强度从LC50降低到LC40,试验梁的极限压应变增加53.75%。由此可得,增大跨中受压区混凝土强度一定程度上降低其极限压应变降低了试件的整体性能。

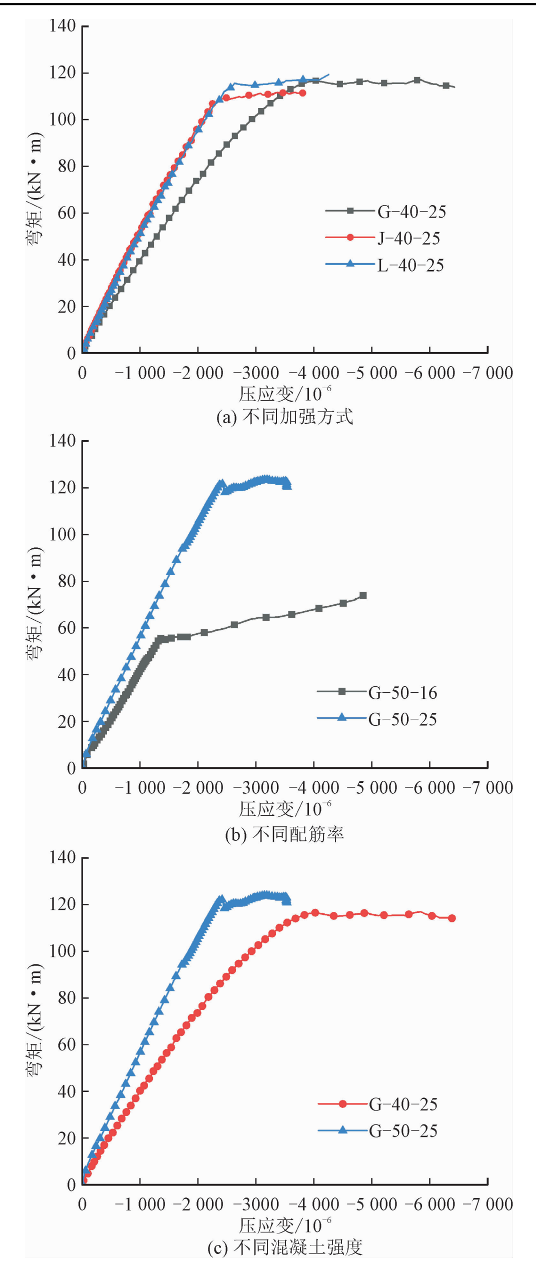


图6　受压区混凝土弯矩-应变

Fig. 6　Bending moment strain of concrete in compression area

2.5　梁弯矩-跨中挠度曲线分析

受压区跨中不同加强方式试件弯矩-跨中挠度曲线关系如图7所示。由图可知,对于受压区跨中使用不同加强方式的试件,在纵筋屈服之前,由于荷载主要是受压区混凝土和纵筋协调控制,各试验梁曲线斜率基本相同,但纵筋屈服后,截面弯矩进一步增大,试验梁的受压区逐渐发挥作用,使用螺旋箍筋加强试件的挠度和峰值荷载最大,采用矩形箍筋加强试件的挠度最小,梁L-40-25的跨中挠度与梁G-40-25和梁J-40-25相比,分别提高了6.12%和16.67%。峰值荷载之后,各试件曲线逐渐下降,采

用矩形箍筋加强试件曲线突然下降,而使用钢纤维加强比螺旋箍筋加强试件曲线下降缓慢。分析原因,是因为钢纤维和螺旋箍筋对受压区混凝土约束比矩形箍筋更加强和均匀。荷载-位移曲线中屈服弯矩所对应的直线与曲线所包围的面积能表示试件在加载过程中的耗能情况,改变是受压区的加载方式能提高试件的耗能能力,引入能量耗散系数(μ)。由表 6 可知,跨中受压区采用螺旋箍筋约束的耗能最好,采用矩形箍筋约束形式耗能最小。试件 G-40-25对试件的耗能影响明显大于试件 J-40-25 和 L-40-25。由上可知,受压区跨中使用螺旋箍筋加强方式对试件的整体性能最好。

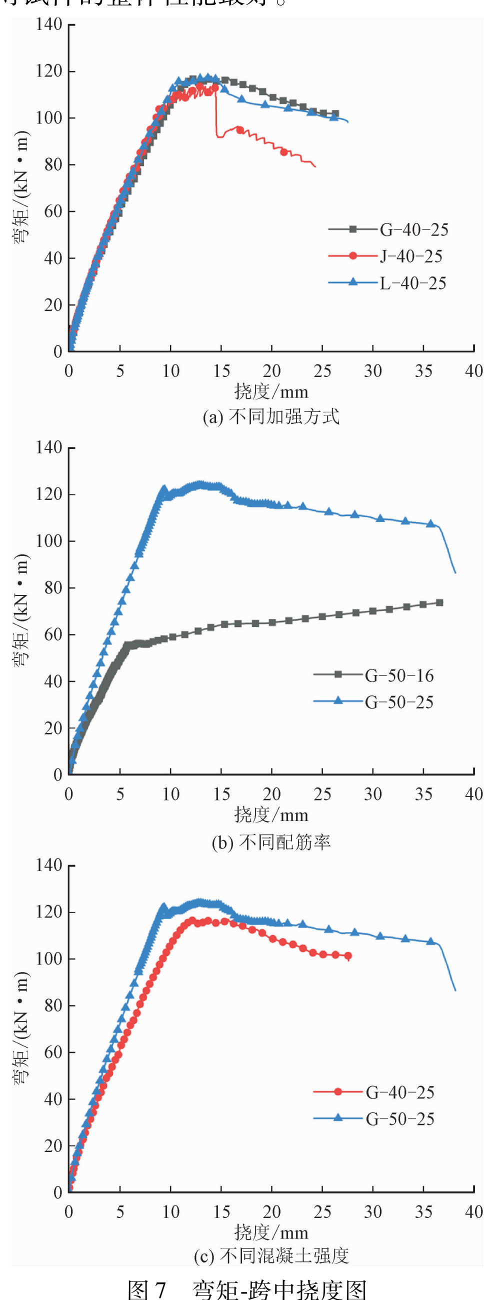


图 7　弯矩-跨中挠度图

Fig. 7　Bending moment midspan deflection diagram

受压区跨中钢纤维加强时不同纵筋配筋率试验梁的弯矩-跨中挠度曲线关系如图 7(b)所示。由图可得,在混凝土开裂前,各试件曲线斜率基本一致,随着弯矩增大,纵筋配筋率大的试件的截面弯矩更大,试件弯矩有明显增大,曲线斜率更陡,纵筋屈服后,纵筋配筋率更大的试件的承载力有明显提高,但试件的延性变化不大,试件 G-50-16 没有明显的下降段,分析缘由,是因为钢纤维的三维多向分布,纤维的拉扯作用,使混凝土的抗压强度得到提高,从而提高试件的整体性能。由此可知,增加试件纵筋配筋率对试件的挠度变化不大,但极大改善试件的承载力。

受压区跨中钢纤维加强时不同混凝土强度试验梁的弯矩-跨中挠度曲线关系如图 7(c)所示,由图可知,纵筋屈服前,弯矩主要是由混凝土和纵向钢筋共同承担,各曲线斜率基本相同,纵筋屈服后,提高加强区混凝土强度,试件的刚度变大,且挠度增大,加强区混凝土由 LC40 增大至 LC50,试验梁挠度增涨了 36.01%。由此可得,增大受压区混凝土强度,试件的承载力有一定幅度增加,但挠度有一定降低。

2.6　延性分析

为了更好地研分析试件的延性,引入试件的位移延性系数(λ)[23],其为极限挠度(Δ_{ult})与屈服挠度(Δ_y)的比值。其中极限挠度为峰值荷载 85% 对应的挠度值,而屈服挠度采用能量法计算。表 6 为受压区跨中加强梁的各特征点弯矩值以及位移延性系数。由表可知,受压区跨中使用不同加强方式梁的开裂弯矩相差不大;经过对比 3 种不同加强方式可知,受压区跨中使用钢纤维加强试验梁的屈服弯矩和屈服挠度最大;而受压区跨中使用螺旋箍加强试件的峰值弯矩和极限挠度最高,承载力和延性最好;受压区跨中使用矩形箍加强试件的承载力和延性最差;试件 L-40-25 的承载力和位移延性系数,与试验梁 J-40-25 相比,分别提高了 4.68% 和 30.8%。由上述研究可知,使用螺旋箍筋加强受压区跨中的方式对提高梁的受弯力学性能最好;对于受压区跨中使用钢纤维加强试件,提高加强区混凝土强度对试验梁开裂荷载影响不大;增大纵筋配筋率试件的弯矩和挠度都有一定程度地提高,但延性降低。由此可知,对试验梁的力学性能提高最好的加强方式为在受压区跨中配置螺旋箍筋加强。

表6 塑钢纤维轻骨料混凝土梁弯矩特征值

Tab.6 Bending moment deflection value of plastic steel fiber lightweight aggregate concrete beam

试件	开裂弯矩/(kN·m)	屈服弯矩/(kN·m)	峰值弯矩/(kN·m)	屈服挠度 Δ_y/mm	极限挠度 Δ_{ult}/mm	位移延性系数 λ	能量耗能散系数 μ
G-50-16	12.60	54.11	74.07	5.77	36.00	6.24	5 400
G-50-25	6.50	122.20	123.96	9.43	38.18	4.05	6 850
G-40-25	6.90	115.69	116.97	11.98	27.64	2.31	6 722
J-40-25	6.30	103.84	111.64	8.88	16.93	1.91	6 400
L-40-25	6.00	114.83	117.12	10.77	26.93	2.50	6 929

3 结 论

1)塑钢纤维对轻骨料混凝土梁有增韧阻裂、延缓裂缝发展的作用,且经受压区跨中加强后塑钢纤维轻骨料混凝土高配筋率梁的超筋破坏现象变为适筋破坏,采用箍筋约束和钢纤维加强的试件受压区破坏形态较好。梁符合平截面假定理论。

2)受压区跨中使用钢纤维加强试件的混凝土极限应变最大,试验梁 G-40-25 与试件 J-40-25 和 L-40-25的极限压应变相比,各自增加了 69.02% 和 51.12%,受压区跨中使用钢纤维加强的试验梁,跨中受压区混凝土的极限压应变随着纵筋配筋率的增大而降低,随着加强区混凝土的强度的提高而降低。

3)受压区跨中使用螺旋箍筋加强试件的挠度和峰值荷载最大,使用矩形箍筋加强试件的挠度最小,梁 L-40-25 的跨中挠度与梁 G-40-25 和梁 J-40-25 相比,分别提高了 6.12% 和 16.67%;对于受压区跨中使用钢纤维加强的混凝土梁,随着配筋率的提高,试件的挠度逐渐增大,纵筋配筋率大的试件承载力有明显提高,但试件的延性变化不大,试件 G-50-25 没有明显的下降段。提高加强区混凝土强度后,试件的刚度变大,且挠度增大,加强区混凝土由 LC40 增大至 LC50,试验梁挠度增涨了 36.01%。

4)受压区跨中使用钢纤维加强试验梁的屈服弯矩和屈服挠度最大,受压区跨中使用螺旋箍加强试件的峰值弯矩和极限挠度最高,承载力和延性最好。而受压区跨中使用矩形箍加强试件的承载力和延性最差。对试验梁的力学性能提高最好的加强方式为在受压区跨中配置螺旋箍筋加强。

参考文献:

[1] HASSANPOUR M, SHAFIGH P, MAHMUD H B. Mechanical properties of structural lightweight aggregate concrete containing low volume steel fiber[J]. Arabian journal for science and engineering, 2014, 39(5): 3579-3590.

[2] ISLAM A, ALENGARAM U J, JUMAAT M Z, et al. Influence of steel fibers on the mechanical properties and impact resistance of lightweight geopolymer concrete[J]. Construction and building materials, 2017, 152: 964-977.

[3] GAO J M, SUN W, MORINO K. Mechanical properties of steel fiber-reinforced, high-strength, lightweight concrete[J]. Cement and concrete composites, 1997, 19(4): 307-313.

[4] 唐巍,张广泰,董海蛟,等.纤维混凝土耐久性能研究综述[J].材料导报,2014,28(11):123-127.
TANG Wei, ZHANG Guangtai, DONG Haijiao, et al. Review on durability of fiber concrete[J]. Materials review, 2014, 28(11): 123-127(in Chinese).

[5] BEHFARNIA K, BEHRAVAN A. Application of high performance polypropylene fibers in concrete lining of water tunnels[J]. Materials & design, 2014, 55: 274-279.

[6] LIM D H, OH B H. Experimental and theoretical investigation on the shear of steel fibre reinforced concrete beams[J]. Engineering structures, 1999, 21(10): 937-944.

[7] LEE H H. Shear strength and behavior of steel fiber reinforced concrete columns under seismic loading[J]. Engineering structures, 2007, 29(7): 1253-1262.

[8] 向晓峰,徐晓伟,刘峰.塑钢纤维增强轻骨料混凝土试验研究[C]//全国高强与高性能混凝土及其应用专题研讨会论文集.杭州:中国土木工程学会,2005:458-462.

[9] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.混凝土结构设计规范(2015 年版):GB 50010-2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2011.

[10] 黄梅梅.受压区设置 GFRP 管的混杂纤维混凝土组合梁的受弯性能研究[D].长沙:湖南大学,2014.

[11] 刘尔怡.中部设置型钢的混凝土梁受弯性能研究[D].长沙:湖南大学,2011.

[12] 张根俞,梁书亭,朱筱俊,等.考虑约束效应的型钢混凝土梁抗弯承载力计算分析[J].东南大学学报(自然科学版),2009,39(3):569-573.
ZHANG Genyu, LIANG Shuting, ZHU Xiaojun, et al. Analysis on bend bearing capacity of steel-encased concrete beams considering the effect of confinement[J]. Journal of Southeast University (natural science edition), 2009, 39(3): 569-573(in Chinese).

[13] 高峰,熊学玉,张少红.考虑区域约束的预应力型钢混凝土梁受弯承载力研究[J].河海大学学报(自然科学版),2015,43(3):249-254.
GAO Feng,XIONG Xueyu,ZHANG Shaohong. Flexural bearing capacity of prestressed steel-reinforced concrete frame beams considering regional constraints[J]. Journal of Hohai University(natural sciences),2015,43(3):249-254(in Chinese).

[14] 姚刚峰,熊学玉.考虑箍筋约束的预应力型钢高强砼梁延性分析[J].哈尔滨工业大学学报,2018,50(6):161-168.
YAO Gangfeng, XIONG Xueyu. Ductility analysis of prestressed steel reinforced high-strength concrete beam considering hoop-confined effect[J]. Journal of Harbin Institute of Technology,2018,50(6):161-168(in Chinese).

[15] 郭智刚,叶见曙,孙智.钢筋混凝土梁受压区加固后新增混凝土高度分析[J].公路交通科技,2009,26(11):60-65,70.
GUO Zhigang, YE Jianshu, SUN Zhi. Analysis on height of new concrete on compressive region of reinforced concrete beams after reinforcement[J]. Journal of highway and transportation research and development,2009,26(11):60-65,70(in Chinese).

[16] ZIARA M M, HALDANE D, KUTTAB A S. Flexural behavior of beams with confinement[J]. ACI structural journal,1995,92(1):103-114.

[17] HADI M N S, ELBASHA N. Effects of tensile reinforcement ratio and compressive strength on the behaviour of over-reinforced helically confined HSC beams[J]. Construction and building materials,2007,21(2):269-276.

[18] BASE G D, READ J B. Effectiveness of helical binding in the compression zone of concrete beams[J]. ACI journal proceedings,1965,62(7):763-782.

[19] 李维.钢-聚丙烯混杂纤维轻骨料混凝土力学性能研究[D].武汉:武汉工程大学,2016.

[20] 姚鹏飞.钢-聚丙烯混杂纤维轻骨料混凝土抗压与抗折性能试验研究[D].武汉:武汉工程大学,2017.

[21] 刘胜兵,姚鹏飞,靳哲鑫,等.钢-聚丙烯纤维轻骨料混凝土抗折性能研究[J].低温建筑技术,2018,40(1):18-20.
LIU Shengbing, YAO Pengfei, JIN Zhexin, et al. Flexural properties of the steel-polypropylene fiber lightweight aggregate concrete[J]. Low temperature architecture technology,2018,40(1):18-20 (in Chinese).

[22] 中华人民共和国住房和城乡建设部.轻骨料混凝土应用技术标准:JGJ/T 12-2019[S].北京:中国建筑工业出版社,2019.

[23] WANG W Q, SHEIKH M N, HADI M N S. Experimental study on FRP tube reinforced concrete columns under different loading conditions[J]. Journal of composites for construction, 2016, 20(5):04016034.

（编辑　史淑英）